



Leseprobe

Frank Hahn

Werkstofftechnik-Praktikum

Werkstoffe prüfen und verstehen

ISBN (Buch): 978-3-446-43258-1

ISBN (E-Book): 978-3-446-44494-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43258-1>

sowie im Buchhandel.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Thermische Analyse – Zustandssysteme</b>	<b>11</b>
1.1	Einleitung	11
1.2	Ziel des Praktikums	12
1.3	Theoretische Voraussetzungen	12
1.4	Grundlagen	13
1.4.1	Phasenumwandlungen	13
1.4.2	Keimbildung und -wachstum	14
1.4.3	Legierungsstrukturen	18
1.4.4	Grundtypen der Zweistoffsysteme	21
1.4.4.1	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand	24
1.4.4.2	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und Unlöslichkeit im festen Zustand	29
1.4.4.3	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – eutektisches System	33
1.4.4.4	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – peritektisches System	36
1.4.4.5	Zweistoffsystem mit intermetallischer Phase	38
1.4.4.6	Phasenumwandlungen im festen Zustand	39
1.4.5	Das Gesetz der abgewandten Hebelarme	40
1.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	42
1.6	Geräte und Hilfsmittel	43
1.7	Versuchsdurchführung	44
1.8	Praktikumsauswertung	45
<b>2</b>	<b>Zugversuch an metallischen Werkstoffen</b>	<b>46</b>
2.1	Einleitung	46
2.2	Ziel des Praktikums	46
2.3	Theoretische Voraussetzungen	47
2.4	Grundlagen	47
2.4.1	Kraft und Spannung	47
2.4.2	Verlängerung und Dehnung	49
2.4.3	Zugproben	50
2.4.4	Verfahrensprinzip	52
2.4.5	Zugversuch – Verformungsbereiche und Auswertung	56
2.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung	62

2.6	Geräte und Hilfsmittel .....	63
2.7	Versuchsdurchführung .....	63
2.8	Praktikumsauswertung .....	65
2.9	Modelllösungen .....	65

### **3 Metallographische Probenpräparation und lichtmikroskopische Gefügeuntersuchung gleichgewichtsnah umgewandelter**

<b>Stähle .....</b>	<b>70</b>	
3.1	Einleitung .....	70
3.2	Ziel des Praktikums .....	71
3.3	Theoretische Voraussetzungen .....	71
3.4	Grundlagen .....	72
3.4.1	Die metallographische Probenpräparation .....	72
3.4.1.1	Trennen .....	73
3.4.1.2	Einfassen .....	75
3.4.1.3	Schleifen und Polieren .....	76
3.4.1.4	Reinigen und Trocknen der Probe .....	78
3.4.1.5	Aufbau und Einstellung des Auflichtmikroskops .....	78
3.4.1.6	Vergrößerung .....	84
3.4.1.7	Auflösungsgrenzen der Lichtmikroskopie .....	86
3.4.1.8	Gesamte förderliche Vergrößerung .....	91
3.4.1.9	Kontrastierungsverfahren .....	91
3.4.2	Das metastabile Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff .....	94
3.4.2.1	Reineisen .....	95
3.4.2.2	Phasen im metastabilen Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	96
3.4.2.3	Gefüge im metastabilen Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff	99
3.4.2.4	Die Stahlecke im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm – Gefüge- umwandlung des Austenits bei der Abkühlung im thermo- dynamischen Gleichgewicht .....	101
3.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	107
3.6	Geräte und Hilfsmittel .....	107
3.7	Versuchsdurchführung .....	108
3.8	Praktikumsauswertung .....	109

### **4 Härteprüfung .....**

4.1	Einleitung .....	111
4.2	Ziel des Praktikums .....	111
4.3	Theoretische Voraussetzungen .....	112
4.4	Grundlagen .....	112
4.4.1	Überblick .....	112
4.4.2	Härteprüfung nach Brinell HBW .....	113
4.4.3	Härteprüfung nach Vickers HV .....	118
4.4.4	Härteprüfung nach Rockwell Skala C HRC .....	122
4.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	125
4.6	Geräte und Hilfsmittel .....	126

4.7	Versuchsdurchführung .....	126
4.8	Praktikumsauswertung .....	129
4.9	Modelllösungen .....	130

## **5 Grundlagen der Wärmebehandlung von Stählen** ..... **134**

5.1	Einleitung .....	134
5.2	Ziel des Praktikums .....	134
5.3	Theoretische Voraussetzungen .....	135
5.4	Grundlagen .....	136
5.4.1	Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gefüge von Stählen .....	136
5.4.1.1	Das Dilatometerverfahren .....	136
5.4.1.2	Diffusionsgesteuerte Umwandlung des Austenits bei leicht erhöhter Abkühlgeschwindigkeit .....	137
5.4.1.3	Die Martensitbildung .....	140
5.4.1.4	Die Bainitbildung .....	144
5.4.1.5	Das Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm .....	145
5.4.1.6	Einfluss von Legierungselementen auf die Umwandlung des Austenits bei der Abkühlung .....	151
5.4.2	Wärmebehandlung von Stahl .....	153
5.4.2.1	Begriffserklärung .....	153
5.4.2.2	Das Normalglühen .....	154
5.4.2.3	Das Härten .....	157
5.4.2.4	Charakterisierung der Härbarkeit .....	164
5.4.2.5	Anlassverhalten von Stählen .....	167
5.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	170
5.6	Geräte und Hilfsmittel .....	172
5.7	Versuchsdurchführung .....	172
5.8	Praktikumsauswertung .....	173
5.9	Modelllösungen .....	175

## **6 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy** ..... **178**

6.1	Einleitung .....	178
6.2	Ziel des Praktikums .....	178
6.3	Theoretische Voraussetzungen .....	179
6.4	Grundlagen .....	180
6.4.1	Zähigkeit und Sprödigkeit .....	180
6.4.2	Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy .....	183
6.4.3	Sprödes Werkstoffverhalten beim KBV .....	186
6.4.4	Duktiles Werkstoffverhalten beim KBV .....	188
6.4.5	Der Bruch beim KBV .....	190
6.4.5.1	Sprödbbruch (Spaltbruch) .....	190
6.4.5.2	Verformungsbruch .....	193
6.4.5.3	Mischbruch .....	195
6.4.6	Einflüsse auf die Zähigkeit .....	196
6.4.7	Das Temperaturkonzept .....	198
6.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	200

6.6	Geräte und Hilfsmittel .....	201
6.7	Versuchsdurchführung .....	201
6.8	Praktikumsauswertung .....	204
6.9	Modelllösungen .....	205
<b>7</b>	<b>Ermüdung und Schwingfestigkeit .....</b>	<b>207</b>
7.1	Einleitung .....	207
7.2	Ziel des Praktikums .....	208
7.3	Theoretische Voraussetzungen .....	208
7.4	Grundlagen .....	208
7.4.1	Ermüdung .....	208
7.4.2	Rissbildung und -wachstum unter schwingender Beanspruchung – Merkmale des Dauerbruchs .....	211
7.4.3	Mechanische Schwingungen .....	214
7.4.4	Einstufige Schwingfestigkeitsuntersuchungen – Wöhlerversuch .....	215
7.4.4.1	Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit im Bereich der Zeitfestigkeit .....	218
7.4.4.2	Bestimmung der Dauerfestigkeit unter Berücksichtigung des Streubandes im Übergangsbereich .....	222
7.4.5	Angabe der Dauerfestigkeit .....	229
7.4.6	Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith .....	229
7.4.7	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit .....	231
7.5	Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung .....	233
7.6	Geräte und Hilfsmittel .....	234
7.7	Versuchsdurchführung .....	234
7.8	Praktikumsauswertung .....	239
7.9	Modelllösungen .....	239
	<b>Anhang – Lösungsteil .....</b>	<b>248</b>
	<b>Index .....</b>	<b>257</b>

# Vorwort

Das Fach „Werkstofftechnik“ ist Bestandteil vieler technischer Studienrichtungen, wie z. B. Maschinen- und Fahrzeugbau, Mechatronik, Wirtschaftsingenieurwesen. Darüber hinaus werden Auszubildende in zahlreichen Lehrberufen mit den Grundlagen der Werkstofftechnik vertraut gemacht. Ziel der Ausbildung ist es, fundamentale Zusammenhänge über Zusammensetzung, Struktur, Gefüge und Eigenschaften zu vermitteln, um im späteren Berufsleben eine zielgerichtete Bearbeitung und einen verantwortlichen und Ressourcen schonenden Einsatz der Werkstoffe zu gewährleisten.

An den Universitäten, Fachhochschulen und Berufsakademien werden die theoretischen Grundlagen in Vorlesungen und Seminaren vermittelt. Ein integriertes Praktikum soll die Studierenden/Auszubildenden mit den Methoden der Werkstoffprüfung vertraut machen. Dabei werden Werkstoffkennwerte bestimmt und die Ursachen für die Eigenschaften ermittelt und besprochen. Die oft komplexen Zusammenhänge lassen sich mit den durchgeführten Experimenten leichter verstehen und erlauben einen fachübergreifenden Überblick, erfordern aber eine ausreichende Vorbereitung von den Praktikumssteilnehmern.

An dieser Stelle setzt das vorliegende Buch an. Neben einer detaillierten Beschreibung des experimentellen Vorgehens sollen insbesondere die physikalischen, chemischen, mathematischen und die werkstofftechnischen Grundlagen gefestigt werden. Die Fragen zur Versuchsvorbereitung dienen der Überprüfung des Wissensstandes und können mit den Antworten im Anhang verglichen werden. Die Versuche werden in dieser Form seit einigen Jahren an der Hochschule Mittweida von den Studierenden der technischen Fachrichtungen durchgeführt und sind für eine Praktikumsdauer von je drei Stunden ausgelegt. Die Werkstoffe und Aufgaben können an anderen Ausbildungsorten variieren, aber die Vorbereitung und der Weg zur Lösung sind in der Regel identisch. Modelllösungen, vorbereitete Tabellen für die Messwerterfassung und Auswerteroutinen sollen nicht nur die Auswertung vereinfachen, sie sollen auch aufzeigen, dass bei der Werkstoffprüfung alle relevanten Daten und Fakten zur Probe, zum Werkstoff und Versuchsablauf erfasst werden müssen, um eine spätere Beurteilung der Versuchsergebnisse zu erlauben.

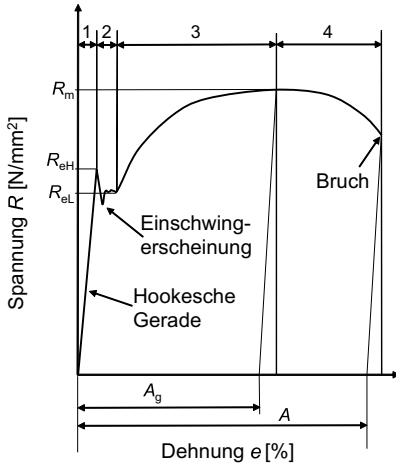
Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Seidel, der mich zum Schreiben des Buches ermuntert und den Text kritisch durchgesehen hat. Ich danke Herrn Andreas Eysert von der Hochschule Mittweida für die zahlreichen metallographischen Aufnahmen und für den fachlichen Rat beim Kapitel „Metallographie“, Frau Angela Bergner für die Unterstützung bei der Erstellung der Grafiken und Herrn Enrico Gehrke für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Frau Christine Fritsch vom Hanser Verlag möchte ich für die redaktionelle Durchsicht, die Förderung des Buches und die stetige Ermutigung danken.

Mittweida, im Januar 2015

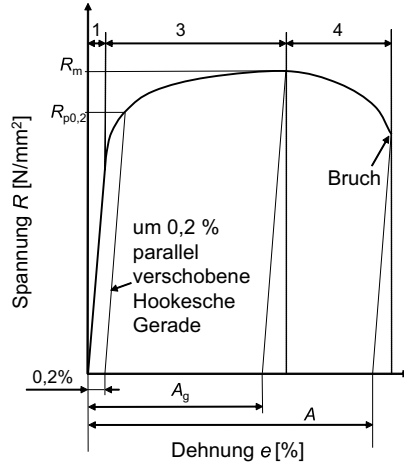
Frank Hahn

### 2.4.5 Zugversuch – Verformungsbereiche und Auswertung

Die während des Zugversuchs gemessenen Kräfte und Verlängerungen werden in Spannung und Dehnung umgerechnet und als Spannung-Dehnung-Diagramm dargestellt. Bei metallischen Werkstoffen wird beim Spannung-Dehnung-Verhalten zwischen Werkstoffen mit ausgeprägter Streckgrenze (Bild 2-9) und Werkstoffen mit gleichmäßigem Übergang von der elastischen zur elastisch-plastischen Verformung (Bild 2-10) unterschieden.



**Bild 2-9** Spannung-Dehnung-Diagramm eines Werkstoffs mit ausgeprägter Streckgrenze



**Bild 2-10** Spannung-Dehnung-Diagramm eines Werkstoffs ohne ausgeprägte Streckgrenze

- 1 Bereich der elastischen Verformung
- 2 Bereich der Lüdersdehnung
- 3 Bereich der Gleichmaßdehnung
- 4 Bereich der Brucheinschnürung
- $R_{eH}$  obere Streckgrenze
- $R_{eL}$  untere Streckgrenze
- $R_{p0,2}$  0,2%-Dehngrenze (Dehngrenze bei plastischer Extensometerdehnung von 0,2%)
- $R_m$  Zugfestigkeit
- $A_g$  Gleichmaßdehnung
- $A$  Bruchdehnung

Im Werkstoffverhalten lassen sich drei bzw. vier Verformungsbereiche unterscheiden:

#### 1. Bereich der elastischen Verformung

Die Spannung steigt über der Dehnung linear an. Dieser Bereich wird auch als Hookesche Gerade bezeichnet. Hier gilt das Hookesche Gesetz mit:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2-6}$$

- $\sigma$  wahre Spannung in  $N/mm^2$  oder MPa
- $E$  Elastizitätsmodul in  $N/mm^2$
- $\varepsilon$  wahre Dehnung; auch Formänderung oder logarithmische Formänderung

Da bei sehr kleinen Verformungen wahre und technische Spannung aber auch (technische) Dehnung und wahre Dehnung praktisch identisch sind, kann das Hookesche Gesetz übertragen werden:

$$R = E \cdot e \quad (2-7)$$

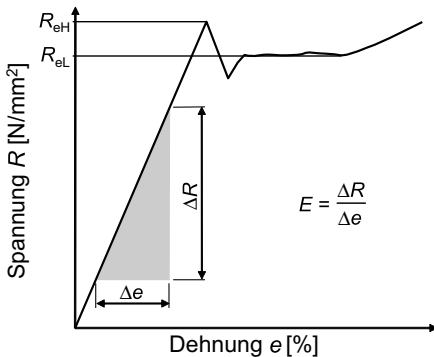
$R$  technische Spannung in  $\text{N}/\text{mm}^2$  oder MPa

$E$  Elastizitätsmodul in  $\text{N}/\text{mm}^2$

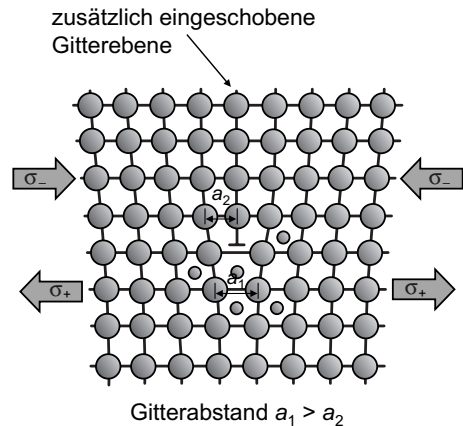
$e$  (technische) Dehnung (einheitenlos – Zur Bestimmung des E-Moduls wird die Dehnung als Absolutwert und nicht in Prozent eingesetzt!)

Aus mathematischer Sicht entspricht der Elastizitätsmodul  $E$  dem Anstieg der Hookeschen Geraden. Er kann im Bereich der elastischen Verformung über das Anstiegsdreieck  $\Delta R/\Delta e$  bestimmt werden (Bild 2-11). Der Elastizitätsmodul ist für jeden Werkstoff charakteristisch (z. B. Stahl:  $E = 210\,000\ \text{N}/\text{mm}^2$ ; Aluminium:  $E = 75\,000\ \text{N}/\text{mm}^2$ ).

*Hinweis:* In der DIN EN ISO 6892-1 hat der Anstieg der Hookeschen Geraden das Symbol  $m_E$ . Der Anstieg der Hookeschen Geraden entspricht nur dann dem Elastizitätsmodul, wenn das Messsystem sehr genau ist und die Zugprobe exakt axial ausgerichtet ist. Diese Differenzierung soll hier aber nicht weiter berücksichtigt werden.



**Bild 2-11** Bestimmung des Elastizitätsmoduls aus dem Anstieg der Hookeschen Geraden



**Bild 2-12** Interstitiell gelöste Fremdatome lagern sich bevorzugt im Zugspannungsfeld von Versetzungen ein (Cottrell-Wolke) und behindern die Versetzungsbewegung

Wird eine Zugprobe langsam belastet und die Streckgrenze  $R_{eH}$  wird nicht überschritten, so geht die Probe bei Entlastung augenblicklich in ihre Ausgangslage zurück. Die gemessene Verlängerung/Dehnung ist im Bereich der elastischen Verformung reversibel.

## 2. Bereich der Lüdersdehnung

Die obere Streckgrenze  $R_{eH}$  kennzeichnet den Übergang von der elastischen zur elastisch-plastischen Verformung. Wird die Streckgrenze überschritten, steigt die Spannung nicht mehr proportional zur Dehnung an. Wird dann die Probe entlastet, geht sie nicht mehr in die Ausgangslage zurück. Neben dem elastischen Verformungsanteil treten auch bleibende,



also plastische Verformungsanteile auf. Für Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze (Bild 2-9 und Bild 2-11) ist es typisch, dass nach dem Erreichen der oberen Streckgrenze  $R_{eH}$  die Spannung zunächst konstant bleibt oder sogar auf ein niedrigeres Niveau, die untere Streckgrenze  $R_{eL}$ , abfällt. Diese Erscheinung ist auf das kombinierte Wirken von Einlagerungsatomen (C, N) und Versetzungen zurückzuführen. Unterhalb von zusätzlich eingeschobenen Gitterebenen (Stufenversetzung) ist das Kristallgitter aufgeweitet und die Zwischengitterplätze sind etwas größer als in ungestörten Gitterbereichen. Deshalb sammeln sich kleine Einlagerungsatome bevorzugt im Zugspannungsfeld von Versetzungen und behindern aber dadurch die Versetzungsbewegung. Diese Ansammlung von Einlagerungsatomen im Zugspannungsbereich von Versetzungen wird als Cottrell-Wolke bezeichnet (Bild 2-12). Erst wenn die obere Streckgrenze erreicht ist, können sich die Versetzungen von den Einlagerungsatomen lösen. Da für die weitere Bewegung weniger Energie notwendig ist, fällt die Spannung bis auf den Wert der unteren Streckgrenze  $R_{eL}$  ab. Im Bereich der Lüdersdehnung ist die Verformung über die Messlänge inhomogen und örtlich konzentriert (Lüdersband). Mit zunehmender plastischer Verformung wandert dieser Bereich durch die ganze Probe.

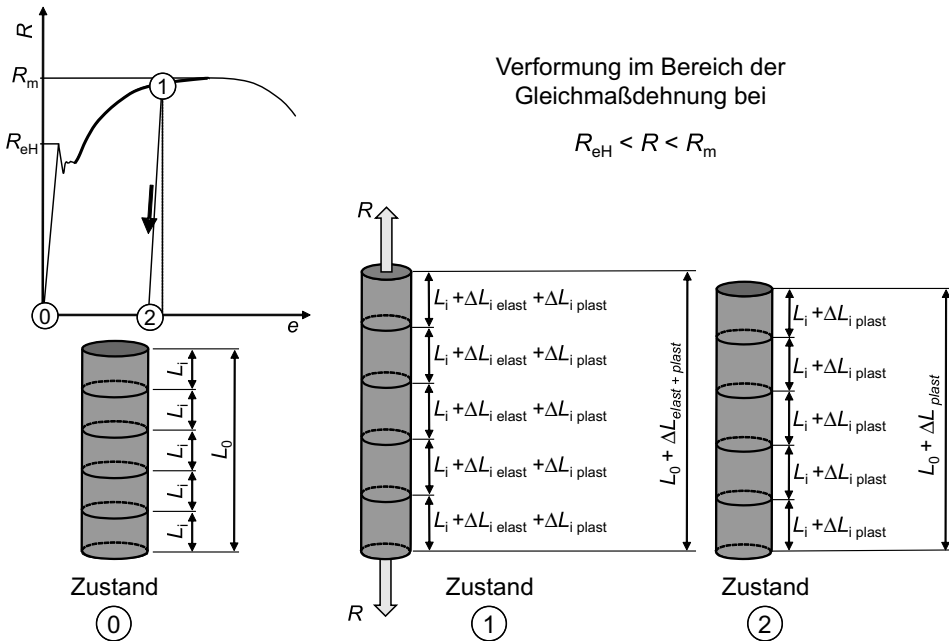
Viele Werkstoffe wie z. B. kaltverformte Stähle, Stähle ohne interstitiell gelöste Fremdatome oder viele kfz-Metalle wie Aluminium- und Kupferlegierungen oder austenitische Stähle zeigen keinen ausgeprägten Streckgrenzeneffekt sondern besitzen einen ganz allmählichen Übergang von der elastischen zur elastisch-plastischen Verformung. Der Bereich der Lüdersdehnung fehlt. Da der Beginn des plastischen Fließens nicht exakt bestimmt werden kann, wird anstelle der Streckgrenze die Dehngrenze  $R_p$  (Dehngrenze bei plastischer Extensometerdehnung) ermittelt. Ausgehend von der Annahme, dass eine sehr kleine plastische Dehnung (z. B. 0,2 %) zulässig ist, wird die Spannung ermittelt, die notwendig ist, diese sehr kleine plastische Verformung zu erreichen. Diese Spannung wird als Dehngrenze  $R_p$  bezeichnet. Das Symbol der Dehngrenze wird ergänzt durch den Betrag der plastischen Verformung in Prozent, z. B.  $R_{p0,2}$ . Die Dehngrenze wird durch Parallelverschiebung der Hookeschen Geraden bis zur Extensometerdehnung von  $e = 0,2\%$  ermittelt (Bild 2-10). Der Schnittpunkt der parallel-verschobenen Geraden mit dem Spannung-Dehnung-Verlauf entspricht der Dehngrenze  $R_{p0,2}$ .

### 3. Bereich der Gleichmaßdehnung (gleichmäßig plastische Verformung)

Der Bereich der Gleichmaßdehnung ist erreicht, wenn die Zugprobe über die gesamte Messlänge homogen verformt wird. Wird die Verformung in diesem Bereich unterbrochen und die Länge der Einzelsegmente  $L_i$  wird an verschiedenen Stellen der Messlänge überprüft, dann wird die gleiche Verlängerung der Einzelsegmente  $\Delta L_i$  festgestellt (Bild 2-13).

Dabei ist zu beachten, dass sich die Verlängerung  $\Delta L_i$  aus einem elastischen und einem plastischen Verformungsanteil zusammensetzt. Natürlich folgt daraus, dass die Querschnittsabnahme auch an jeder Stelle im Bereich der Messlänge identisch sein muss. Wird die Belastung nicht nur unterbrochen, sondern die Probe wird komplett entlastet, dann lässt sich eine elastische Rückfederung feststellen. Die Verformung ist also keine „reine“ plastische Verformung sondern ist elastisch-plastisch.

Im Bereich der Gleichmaßdehnung steigt die Spannung mit zunehmender Verformung an. Obwohl während des Zugversuchs der tragende Querschnitt stetig abnimmt, werden mit zunehmender Verformung höhere Spannungen benötigt, um das plastische Fließen aufrecht zu erhalten. Dieser Effekt ist auf die Verformungsverfestigung zurückzuführen. Die plastische Verformung von metallischen Werkstoffen beruht i. Allg. auf Versetzungsbewegung.



**Bild 2-13** Gleichmaßdehnung – Jedes Segment  $L_i$  innerhalb der Messlänge  $L_0$  verlängert sich um den gleichen Betrag  $\Delta L_i$ . Unter der Wirkung der technischen Spannung  $R$  setzt sich die Formänderung aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen (Zustand 1). Wird die Zugprobe entlastet verbleibt nur der plastische Verformungsanteil (Zustand 2).

Versetzungsbewegung ist immer mit Versetzungsvervielfachung verbunden. Je mehr Versetzungen im Werkstoff enthalten sind, um so stärker behindern sich diese in der Beweglichkeit. Die höchste (technische) Spannung, die während des Zugversuchs auftritt, wird als Zugfestigkeit  $R_m$  bezeichnet. Sie schließt den Bereich der gleichmäßig plastischen Verformung ab. Die Zugfestigkeit lässt sich aus der Höchstkraft  $F_m$  und der Anfangsquerschnittsfläche  $S_0$  berechnen:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \tag{2-8}$$

- $R_m$  Zugfestigkeit in  $N/mm^2$  oder MPa
- $F_m$  Höchstkraft in N
- $S_0$  Anfangsquerschnittsfläche in  $mm^2$

Der wichtigste Verformungskennwert, der im Bereich der gleichmäßig plastischen Verformung ermittelt werden kann, ist die Gleichmaßdehnung  $A_g$  (= plastische Extensometerdehnung bei Höchstkraft). Die Gleichmaßdehnung entspricht dem Anteil der plastischen Verformung an der Dehnung  $e$  beim Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$ . Die Gleichmaßdehnung wird in der Regel grafisch ermittelt, indem die Hookesche Gerade bis zur Zugfestigkeit  $R_m$  parallel verschoben wird (Bild 2-9 und Bild 2-10). Der Schnittpunkt der parallel verschobenen Gerade mit der Abszisse entspricht der Gleichmaßdehnung. Eine rechnerische Bestimmung ist möglich, wenn der Anteil der elastischen Verformung mithilfe des Hookeschen Ge-

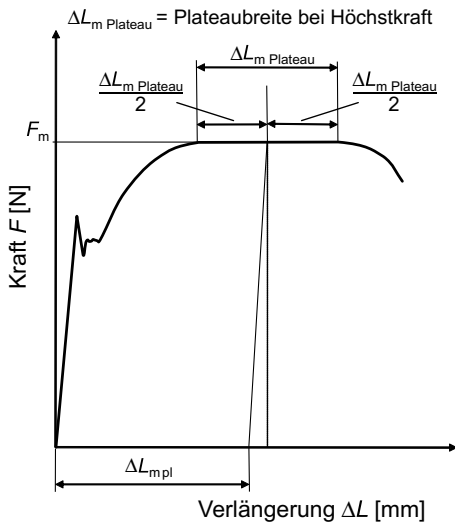
setzes aus der Zugfestigkeit ermittelt wird und von der Gesamtdehnung bei  $R_m$  abgezogen wird:

$$\Delta A_g = \frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{E} \tag{2-9}$$

- $A_g$  Gleichmaßdehnung in %
- $\Delta L_m$  Verlängerung der Extensometermesslänge bei Höchstkraft in mm
- $L_e$  Anfangsmesslänge der Längenmesseinrichtung (Extensometer) in mm
- $R_m$  Zugfestigkeit in  $N/mm^2$
- $E$  Elastizitätsmodul in  $N/mm^2$

*Hinweis:* Unterscheidet sich der ermittelte Anstieg der Hookeschen Geraden  $m_E$  vom Elastizitätsmodul  $E$  (z. B. bei ungenauer Ausrichtung der Probe), wird der elastische Anteil mit  $R_m/m_E$  berechnet.

Oftmals bleibt die Höchstkraft über einen Verformungsbereich praktisch konstant (Bild 2-14). In solchen Fällen wird die Gleichmaßdehnung  $A_g$  bzw. die Verlängerung der Extensometermesslänge  $\Delta L_m$  in die Mitte des Plateaus gelegt.



**Bild 2-14** Weist die Kraft-Verlängerung-Kurve ein Plateau bei der Höchstkraft auf, wird zur Bestimmung der Gleichmaßdehnung die Mitte des Plateaus verwendet

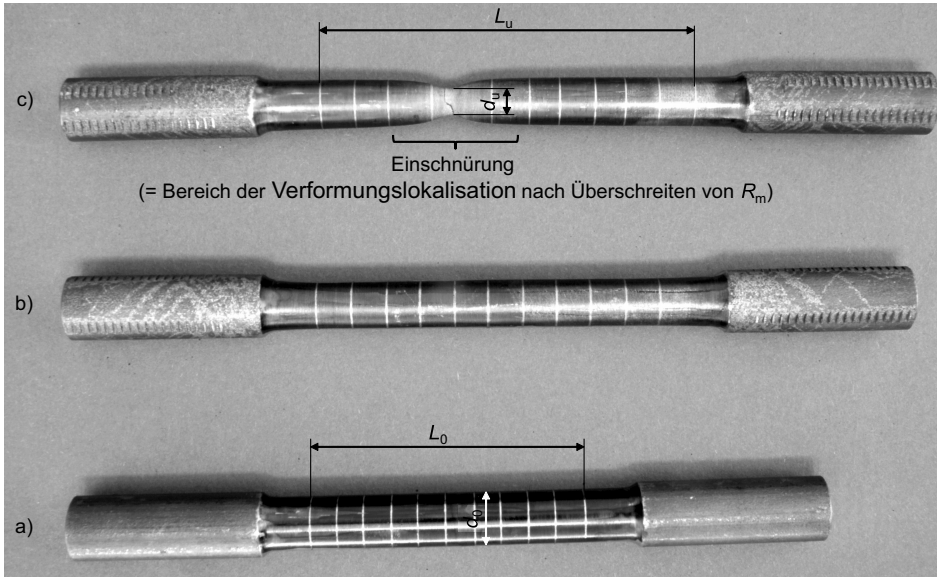
#### 4. Bereich der Brucheinschnürung

Wird die Zugfestigkeit  $R_m$  überschritten, beginnt sich die Zugprobe einzuschnüren. Eine weitere Verlängerung und Querschnittsabnahme erfolgt bis zum Bruch nur noch im Bereich der Einschnürung. Alle Werkstoffsegmente, die zur Messlänge gehören, sich aber außerhalb der Einschnürung befinden, verformen sich nicht weiter. Die Verformung ist also lokal begrenzt (Bild 2-15). Die plastische Dehnung zum Zeitpunkt des Bruches wird als Bruchdehnung  $A$  bezeichnet. Sie kann aus dem Spannung-Dehnung-Diagramm durch Parallelverschiebung der Hookeschen Geraden bis zur Bruchspannung ermittelt werden (Bild 2-9 und Bild 2-10). Außerdem ist es möglich, die Bruchdehnung  $A$  aus der geänderten Probengeometrie zu bestimmen. Dazu ist es erforderlich, die beiden gebrochenen Hälften der Probe in

einer Achse sorgfältig zusammenzulegen und die Messlänge nach dem Bruch  $L_u$  zu bestimmen (Bild 2-15c). Die Bruchdehnung wird wie folgt berechnet:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \% \quad (2-10)$$

- $A$  Bruchdehnung in %  
 $L_u$  Messlänge nach dem Bruch in mm  
 $L_0$  Anfangsmesslänge in mm



**Bild 2-15** Unterschiedlich gedehnte Zugproben; a) unverformt; b) im Bereich der Gleichmaßdehnung verformte Zugprobe; c) gebrochene Probe

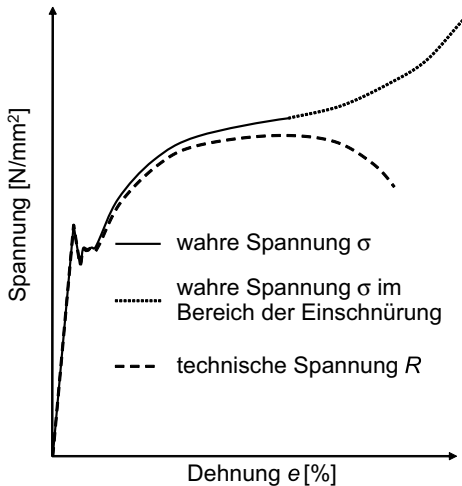
Außerdem wird aus der Änderung der Probengeometrie die Brucheinschnürung  $Z$  berechnet. Sie ist die größte Querschnittsänderung der Zugprobe im Bereich der Einschnürung, bezogen auf die Anfangsquerschnittsfläche  $S_0$ . Dafür muss bei Rundzugproben der kleinste Durchmesser nach dem Bruch  $d_u$  gemessen werden, welcher an der Bruchstelle vorliegt (Bild 2-15c).

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 \% \quad (2-11)$$

- $Z$  Brucheinschnürung in %  
 $S_0$  Anfangsquerschnittsfläche in  $\text{mm}^2$   
 $S_u$  Querschnittsfläche nach dem Bruch in  $\text{mm}^2$

An Flachzugproben mit großer Breite und geringer Dicke (dünne Bleche) ist es in der Regel nicht möglich, die Brucheinschnürung zu ermitteln. Ein Riss bildet sich in der Mitte der Probe und weitet sich linsenartig in der Mitte der Bruchebene bis zur endgültigen Materialtrennung immer weiter auf. Diese allmähliche Bruchbildung führt zu lokal unterschiedlichen Probenstärken nach dem Bruch  $b_u$  und einer nicht definierbaren Probenbreite  $a_u$ .

Am Spannung-Dehnung-Diagramm fällt auf, dass die Kraft  $F$  bzw. die Spannung  $R$  nach dem Überschreiten der Zugfestigkeit  $R_m$  abfällt. Dennoch gibt es auch weiterhin Verformungsverfestigung, die allerdings auf den Werkstoff im Bereich der Einschnürung konzentriert bleibt. Wird die gemessene Kraft  $F$  auf den augenblicklich kleinsten Querschnitt  $A$  und nicht auf die Anfangsquerschnittsfläche  $S_0$  bezogen, also die wahre Spannung  $\sigma$  ermittelt und über der Dehnung aufgetragen, wird deutlich, dass auch nach dem Überschreiten der Zugfestigkeit die Spannung weiter ansteigt (Bild 2-16).



**Bild 2-16** Vergleich der technischen und der wahren Spannung im Zugversuch

## ■ 2.5 Kontrollfragen zur Praktikumsvorbereitung

Überprüfen Sie Ihr Vorwissen anhand der folgenden Kontrollfragen! Sie können ihre Antworten mit den Lösungen im Anhang des Buches vergleichen.

- 2.5-1 Welche Ursache hat die plastische Verformung bei metallischen Werkstoffen?
- 2.5-2 Warum sind Metalle mit kubisch-flächenzentriertem Gitter besser verformbar als hexagonal-dichtestgepackte Metalle?
- 2.5-3 Welche Ursache hat die Verformungsverfestigung?
- 2.5-4 Warum werden im Zugversuch die gemessenen Kräfte in Spannungen umgerechnet?
- 2.5-5 Definieren Sie die Begriffe Festigkeit, Verformbarkeit und Zähigkeit.
- 2.5-6 Welche Phasen und Gefüge liegen im gleichgewichtsnahen Zustand bei Raumtemperatur bei den Stählen C45, C80 und C130 vor?
- 2.5-7 Was ist unter den Wärmebehandlungsverfahren Normalglühen, Härten und Vergüten zu verstehen? Welche Gefüge entstehen beim Stahl C45 bei diesen Verfahren?

Überprüfen Sie Ihr Wissen zu folgenden Punkten:

- diffusionsgesteuerte Phasenumwandlung (1.2.1)
- Keimbildung und Keimwachstum (1.2.3)
- Einlagerungs- und Austauschmischkristalle (2.1.1)
- Zustandssysteme/Grundtypen der Zweistoffsysteme (2.2.2)
- Begriffe: Phase und Gefüge (1.2.1, 2.1.4)
- Kristall, Kristallit, Korn, Korngrenze, Phasengrenze (1.1.2.3)
- Gefügeanalyse, Materialographie, Metallographie (12.4)
- Stahl, untereutektoider und übereutektoider Stahl (6.1.1 und 6.1.2)
- Normalglühen (4.2.1.3)

Die Hersteller von Präparationsgeräten und den dazugehörigen Verbrauchsmaterialien aber auch Hochschulen und die Deutsche Gesellschaft für Materialkunde bieten eine umfangreiche Unterstützung in Form von Büchern, Broschüren, Linksammlungen zum Thema Metallographie/Materialographie, Lehrgänge oder Onlinehilfen bei der Wahl der Präparationstechnik an. An grundlegender Fachliteratur zum Thema Präparationstechniken können folgende Publikationen empfohlen werden:

Oettel, H.; Schumann, H.: Metallografie. – 15. Auflage. – Wiley-VCH, 2011

Bjerregaard, L.; Geels, K.; Ottesen, B.; Rückert, M.: Metalog Guide. – Struers A/S, 2000

SumMet – Die Summe unserer Erfahrung, Hrsg.: Buehler, An ITW Company, 2007

## ■ 3.4 Grundlagen

### 3.4.1 Die metallographische Probenpräparation

In der Praxis ist es die Regel, dass die Werkstücke, für deren Gefüge wir uns interessieren, für eine lichtmikroskopische Gefügeuntersuchung viel zu groß sind. Deshalb muss zunächst eine Probe hergestellt werden. Eine Probe ist ein Teil einer Werkstoffmenge oder eines Werkstücks, von dem angenommen wird, dass es die Eigenschaften dieser Menge aufweist. An dieser Probe können also die Eigenschaften des gesamten Werkstoffs untersucht werden. Dafür muss die Probe dem Werkstück entnommen und präpariert werden. Die Wahl der effektivsten Präparationstechnik setzt eine große praktische Erfahrung voraus. Eine falsche Präparationstechnik verändert den Werkstoffzustand (z. B. thermische Beeinflussung beim Schneidbrennen), kann die Probe zerstören (z. B. Bruch von spröden Werkstoffen), begünstigt das Abplatzen von Schichten und das Ausbrechen spröder Partikel oder führt zu Fehlinterpretationen bei der Gefügebeurteilung (z. B. Eindrücken von Schleifpartikeln in Werkstoffe mit geringer Härte, plastische Verformung an Trenn- und Schliefflächen = Beilby-Schicht). Beim Anfertigen eines metallographischen Schliffs ist darauf zu achten, dass:

- die Kanten des Schliffs beim Schleifen/Polieren nicht abgerundet werden,
- kein Oberflächenrelief entsteht, indem weichere Gefügebestandteile stärker abgetragen werden,
- bei beschichteten Werkstücken immer von der Schicht zum Substratmaterial zu trennen und zu schleifen ist, um das Abplatzen der Schicht zu verhindern,
- zwischen den Bearbeitungsschritten eine gründliche Reinigung der Probe erfolgt.

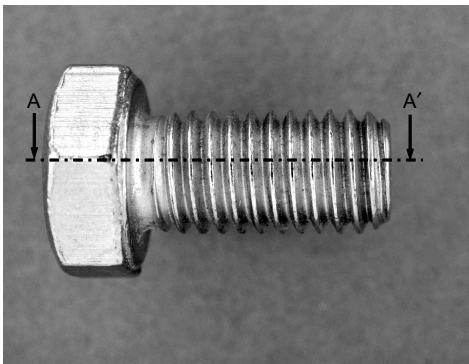
Die Probenpräparation setzt sich aus den Schritten Trennen, Einfassen, Schleifen, Polieren und Ätzen zusammen. Zwischen den einzelnen Präparationsschritten werden die Proben gründlich gereinigt. Bevor mit der eigentlichen Präparation begonnen werden kann, sind im Protokoll wichtige Probendetails festzuhalten:

- Werkstücknummer
- Art des untersuchten Werkstücks
- Werkstoff/Werkstoffzustand
- Lage der anzufertigenden Schlitze im Werkstück mit Schliff- bzw. Probennummer
- Arbeitsaufgabe
- Name des Prüfers
- Datum

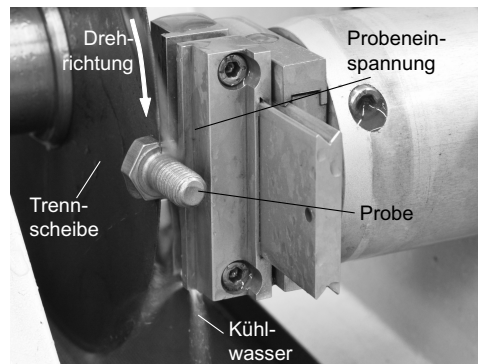
Später sind im Protokoll die Präparationstechnik und -parameter, die Art der Ätzlösung und die Dauer der Ätzung zu dokumentieren.

### 3.4.1.1 Trennen

In der Regel muss dem Bauteil/Werkstück/Halbzeug durch Trennen eine Probe entnommen werden. Diese Probe muss das Gefüge des untersuchten Materials repräsentieren. Herstellungsbedingt können richtungsabhängige Gefügeunterschiede auftreten (z. B. Quer- oder Längsschliff bei kaltgezogenen Drähten). Deshalb ist vor der Probenentnahme auf einem Foto oder einer Skizze die Probenlage im Bauteil und die Lage der Schlitze zu dokumentieren (Bild 3-1). Für die Trennung können verschiedene Fertigungsverfahren wie Sägen, elektroerosive Trennung, Wasserstrahlschneiden, Nass- oder Trockentrennschleifen eingesetzt werden.



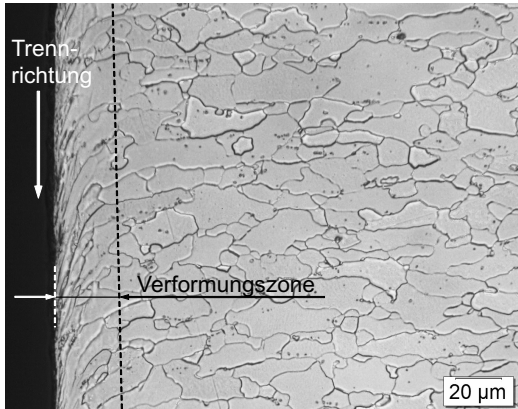
**Bild 3-1** Schraube mit eingezeichneter Lage der vorgesehenen Schnittfläche (Foto: A. Eysert, Hochschule Mittweida)



**Bild 3-2** Probenherstellung – Nasstrennschleifen des Werkstücks (Foto: A. Eysert, Hochschule Mittweida)

Beim Trennen lässt sich eine plastische Verformung und u. U. eine thermische Belastung im Bereich der Trennfläche nicht vollständig vermeiden (Bild 3-3). Durch nachfolgende Präparationsschritte (Schleifen, Polieren) muss die beeinflusste Schicht abgetragen werden. Eine ausreichende Kühlung und geringe Schnittkräfte führen zumindest zu einer Minimierung der Werkstoffbeeinflussung. Insbesondere bei metallischen Werkstoffen wird die geringste

Werkstoffbeeinflussung durch Nasstrennschleifen erreicht (Bild 3-2). So ist für das Trennschleifen eine Bearbeitungsschicht mit einer Dicke von 20... 150 µm typisch. In Abhängigkeit von der Härte und der Zähigkeit des Materials können Trennscheiben gewählt werden, die sich in der Art der Hartstoffe, in der Korngröße der Hartstoffe, im Binder und im Binderanteil unterscheiden (Tabelle 3-1). Neben der Zusammensetzung der Trennscheiben wird die Qualität des Schnitts und die Standzeit der Trennscheibe durch die Schnittgeschwindigkeit/Drehzahl, den Vorschub, die Schnittkraft, das Kühlmittel und die Kühlmittelmenge beeinflusst.



**Bild 3-3** Durch das Trennen wird der Werkstoff im Bereich der Schnittkante plastisch verformt. Schliff quer zur Schnittrichtung, Tiefziehblech DC03, geätzt mit 3%iger alkoholischer HNO<sub>3</sub> (Foto: A. Eysert, Hochschule Mittweida)

**Tabelle 3-1** Übliche Schneidstoff-Binder-Kombinationen für Trennscheiben zum Nasstrennschleifen

Zu bearbeitender Werkstoff	Härte des zu trennenden Werkstoffs	Schneidstoff	Bindung
weiche Nichteisenwerkstoffe, z. B. Aluminium- und Kupferlegierungen	< 300 HV	SiC	Kunsthartz oder Gummi
zähe, mittelharte Nichteisenwerkstoffe, z. B. Titanlegierungen	100... 350 HV	SiC	Kunsthartz oder Gummi
hochfeste, zähe Nichteisenwerkstoffe, z. B. Nickelbasis- und Cobaltbasislegierungen	200... 500 HV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oder cBN	Kunsthartz
weiche Eisenwerkstoffe, z. B. DC01 bis DC07, Armco-Eisen	50... 350 HV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kunsthartz oder Gummi
mittelharte Eisenwerkstoffe, z. B. normalgeglühte oder weichgeglühte untereutektoide Stähle, allgemeine Baustähle, GJS, GJL	200... 550 HV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kunsthartz
harte Eisenwerkstoffe, z. B. vergütete Stähle, gehärtete Warmarbeitsstähle, ADI	300... 750 HV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kunsthartz
sehr harte Eisenwerkstoffe, z. B. gehärtete Kalt- und Schnellarbeitsstähle, Hartguss	500... 900 HV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oder cBN	Kunsthartz
Hartmetalle und Keramiken	800... 2000 HV	Diamant	Kunsthartz
Verbundwerkstoffe, z. B. kohlenstoff- oder glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe		Diamant	Metall

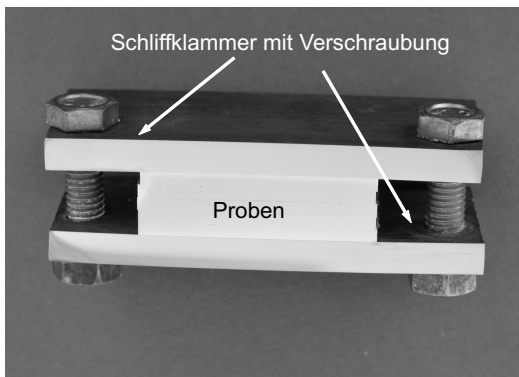


Um einen geraden und ebenen Schnitt zu bekommen, muss die Probe fest gespannt sein. Ist die Probe zu locker, kann sich u. U. die Trennscheibe im Werkstück verkeilen und zerstört werden. Allerdings kann bei sehr spröden Werkstoffen eine zu große Spannkraft die Probe zerbrechen. Unmittelbar nach dem Trennen ist die Probe dauerhaft zu bezeichnen bzw. mit einer Probennummer zu versehen. Diese Bezeichnung muss auf der Probe jederzeit lesbar und eindeutig dem Werkstück zuzuordnen sein. Die Probenbezeichnung wird wie die Schlifflage im Protokoll dokumentiert.

### 3.4.1.2 Einfassen

Um die Proben beim Schleifen und Polieren besser handhaben zu können und dabei Kantenabrundungen oder ein Ausbrechen der Kanten oder von Randschichten zu vermeiden, werden die Proben eingefasst. Einbettformen geben den Proben nach dem Einbetten eine definierte Außengeometrie, sodass eine nachfolgende automatische Probenpräparation möglich wird. Insbesondere bei sehr kleinen oder scharfkantigen Proben schützt die Einbettung vor Verletzungen bei der Präparation.

Im einfachsten Fall werden die Proben in einer Schliffklammer eingefasst (Bild 3-4). Dabei sollte der Werkstoff der Schliffklammer dem zu präparierenden Material ähnlich sein, sonst werden beim Schleifen die Probe und die Schliffklammer unterschiedlich schnell abgetragen. Die Gefahr der Kantenabrundung würde steigen. Schliffklammern werden häufig für die Präparation von Blechen verwendet.



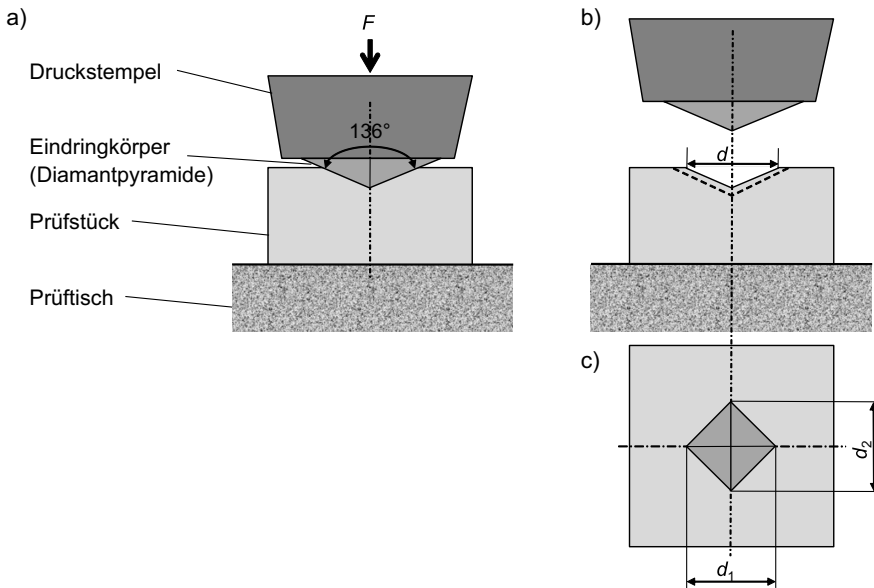
**Bild 3-4** Sehr dünne Proben, wie z. B. Querschliffe von Tiefziehblechen, werden häufig in Schliffklammern präpariert. Das erlaubt eine sichere Handhabung und vermeidet eine Kantenabrundung. Bei Blechen lassen sich, wie hier zu sehen ist, auch mehrere Proben gleichzeitig präparieren. (Foto: A. Eysert, Hochschule Mittweida)

Oft werden die Proben in einem Polymer auf Epoxidharz-, Polyesterharz- oder auf Acrylbasis eingebettet. Je nach verwendetem Harz unterscheiden sich:

- die Einbetttemperatur – Kalteinbetten bei Raumtemperatur oder Warmeinbetten je nach Aushärtetemperatur des Polymers zwischen 80 °C und 170 °C,
- die Aushärtezeit von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden,
- die Viskosität des Harzes beim Vergießen,
- die Härte des Polymers,
- die Haftung des Einbettmittels an der Probe,
- die Transparenz des Polymers,
- die Schrumpfung beim Aushärten (große Schrumpfung verschlechtert die Haftung von Harz und Probenmaterial, kann zu unerwünschter Kantenabrundung führen),
- die elektrische Leitfähigkeit (erforderlich für rasterelektronische Untersuchungen).

### 4.4.3 Härteprüfung nach Vickers HV

Das Härteprüfverfahren nach Vickers ist aus der Brinellprüfung entstanden und läuft nach einem ähnlichen Muster ab. Eine Diamantpyramide dient als Eindringkörper und wird mit einer definierten Kraft  $F$  in den Werkstoff gedrückt. Nach der Entlastung werden die Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  des verbleibenden Eindrucks vermessen (Bild 4-5). Die Vickershärte entspricht dem Quotienten aus Prüfkraft und der Oberfläche des verbleibenden Härteeindrucks. Die Härteprüfung nach Vickers ist in der DIN EN ISO 6507 standardisiert.



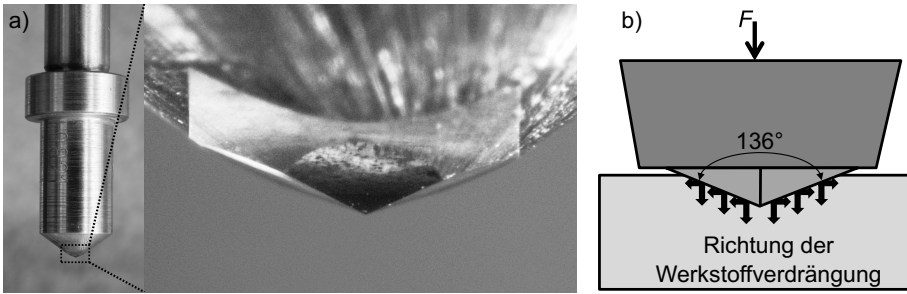
**Bild 4-5** Prinzip der Vickershärteprüfung – a) Unter der Wirkung der Prüfkraft  $F$  wird die Diamantpyramide in das Prüfstück gedrückt. b) Nach 10... 15 s Haltezeit wird der Eindringkörper entlastet. Die Entlastung führt zu einer geringen elastischen Rückfederung im Prüfstück. c) Die Diagonalen des verbleibenden Härteeindrucks  $d_1$  und  $d_2$  werden gemessen und der Mittelwert  $d$  wird aus beiden berechnet.

#### Eindringkörper

Als Eindringkörper bei der Vickershärteprüfung wird eine Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche und einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$  verwendet (Bild 4-6). Von der unmittelbaren Spitze der Pyramide abgesehen, bleibt der Spannungszustand an den Seitenflächen der Pyramide unabhängig von der Eindringtiefe konstant (Bild 4-6b). Zumindest im konventionellen Härtebereich (HV 5 bis HV 100) führt diese Geometrie des Eindringkörpers zu lastunabhängigen Härtewerten. Diamant als härtester Stoff in Natur und Technik erlaubt es, an praktisch allen Materialien die Härte zu prüfen.

#### Prüfkraft

Für die Vickershärteprüfung stehen der konventionelle Härtebereich, der Kleinkraftbereich und der Mikrohartbereich mit jeweils mehreren Prüfkraften zur Verfügung (Tabelle 4-2). Diese Einteilung erlaubt es, die Prüfkraft für eine konkrete Prüfaufgabe auszuwählen. Für die



**Bild 4-6** a) Bei der Vickershärteprüfung wird eine Diamantpyramide als Eindringkörper verwendet. b) Der konstante Öffnungswinkel von  $136^\circ$  sorgt für einen gleichbleibenden Spannungszustand im Werkstoff unter der Diamantpyramide. Das hat den Vorteil, dass bei veränderten Prüfkraften das Verhältnis von Prüfkraft zur Eindruckoberfläche (= Härte) gleich bleibt.

Bestimmung eines repräsentativen Härtewertes wird mit einer Prüfkraft aus dem konventionellen Härtebereich gearbeitet, üblicherweise mit 294,2 N (HV 30). Ist die Härte an sehr dünnen Blechen oder sehr weichen Werkstoffen zu ermitteln, werden kleinere Prüfkraften verwendet. Bei sehr harten Werkstoffen wird mit HV 50 oder HV 100 geprüft. Eine Prüfkraft aus dem Kleinkraftbereich wird gewählt, wenn die Härte einer dünnen Schicht zu bestimmen ist oder wenn ein Härtegradient zu messen ist. So werden beispielsweise für die Bestimmung der Einsatzhärtungs-Härtetiefe CHD nach DIN 50 190-1 in definierten Abständen Härteeindrücke mit HV 1 an einem Querschliff gesetzt und eine Härteverlaufskurve ermittelt. Ähnlich wird auch bei der Bestimmung der Nitrier-Härtetiefe NHD und der Einhärtungs-Härtetiefe SHD vorgegangen. Prüfkraften aus dem Mikrohärtbereich werden dann gewählt, wenn die Härte in einzelnen Gefügebereichen gemessen werden soll. Da die Härteeindrücke nur noch sehr klein sind, werden diese mit einem Mikroskop oder Elektronenmikroskop ausgemessen.

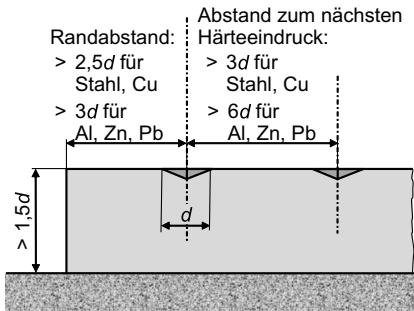
**Tabelle 4-2** Härtebereiche und Prüfkraften bei der Vickershärteprüfung nach DIN EN ISO 6507

Konventioneller Härtebereich		Kleinkraftbereich		Mikrohärtbereich	
Härtesymbol	Prüfkraft $F$ in N	Härtesymbol	Prüfkraft $F$ in N	Härtesymbol	Prüfkraft $F$ in N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,02	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,049 03
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7
Anwendung allgemeine Härteprüfung		Härteverläufe, Prüfung dünner Folien und Schichten		Bestimmung der Härte in ein- zelnen Gefügen und Gefügebe- standteilen	

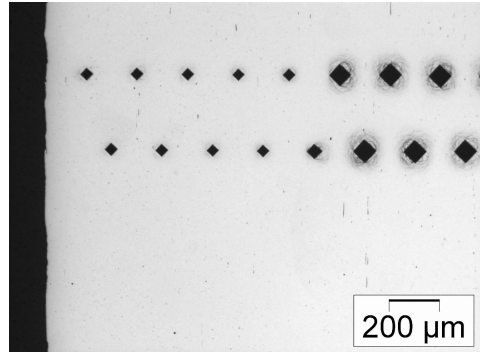
### Härteeindruck

Um die Beeinflussung des Messwertes von der Geometrie oder von der Verformungsverfestigung eines vorangegangenen Härteeindrucks auszuschließen, muss wie bei Brinell darauf

geachtet werden, dass Mindestabstände zum Rand der Probe und zum nächsten Härteeindruck eingehalten werden (Bild 4-7). Auch eine Mindestdicke ist zu berücksichtigen bzw. es muss die Prüfkraft so abgesenkt werden, dass ein Durchdrücken des Eindringkörpers oder eine Markierung auf der Rückseite der Probe ausgeschlossen ist. Insbesondere bei der Bestimmung von Härteverläufen ist oft ein möglichst kleiner Abstand zwischen den Einzelmessungen gefragt. Um die o. g. Mindestabstände einzuhalten, werden deshalb die Härteeindrücke versetzt in zwei oder drei Spuren gesetzt (Bild 4-8).



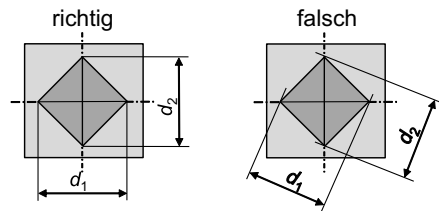
**Bild 4-7** Mindestabstände bei der Vickershärteprüfung



**Bild 4-8** Versetzte Härteeindrücke zur Bestimmung eines Härteverlaufs an einer einsatzgehärteten Randschicht

### Durchführung und Auswertung

Nachdem die Probe gereinigt und evtl. angeschliffen wurde, wird sie auf den Probentisch gelegt und verspannt. Nach der Einstellung der Prüfkraft am Härteprüfgerät, wird der Eindringkörper eingeschwenkt, auf die Probe aufgesetzt und die Prüfkraft wird allmählich innerhalb von 2... 8 s stoßfrei aufgebracht. Die Prüfkraft wird 10... 15 s konstant gehalten. Anschließend wird der Eindringkörper entlastet und ausgeschwenkt. Am verbleibenden Härteeindruck werden die Längen der Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  gemessen. Dabei ist darauf zu achten, dass exakt parallel zur gedachten Geraden zwischen den Eckpunkten des Härteeindrucks gemessen wird (Bild 4-9).



**Bild 4-9** Die Diagonalen des Härteeindrucks sind parallel auszumessen.

Aus  $d_1$  und  $d_2$  wird der arithmetische Mittelwert berechnet:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \tag{4-5}$$

$d_1; d_2$  gemessene Diagonalenlänge des Härteeindrucks in mm  
 $d$  mittlere Diagonalenlänge des Härteeindrucks in mm

Der Vickershärtewert berechnet sich aus dem Verhältnis von Prüfkraft zur Oberfläche des Härteeindrucks, also der Außenfläche einer Pyramidenspitze:

$$HV = \frac{\text{Prüfkraft}}{\text{Oberfläche des Eindrucks}} \quad (4-6)$$

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (4-7)$$

Vereinfacht gilt:

$$HV \approx 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4-8)$$

$F$  Prüfkraft in N

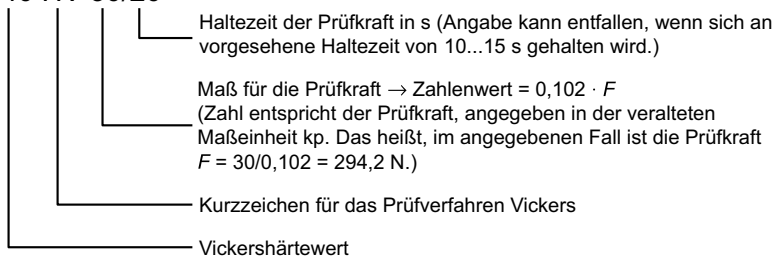
$d$  mittlere Diagonalenlänge des Härteeindrucks in mm

Die Vickershärte kann außerdem mithilfe der Auswertetabelle in der DIN EN ISO 6507-4 bestimmt werden.

#### Angabe der Vickershärte

Die Vickershärte wird wie im folgenden Beispiel normgerecht angegeben:

640 HV 30/20



#### Vor- und Nachteile

Der entscheidende Vorteil der Vickershärteprüfung ist die Lastunabhängigkeit der Härtewerte im konventionellen Härtebereich. Unabhängig davon, ob die Prüfung mit einer Prüfkraft von 49,03 N oder mit 980,7 N durchgeführt wurde, lassen sich die Härtewerte miteinander vergleichen. Außerdem erlaubt die extrem hohe Härte des Eindringkörpers, praktisch alle Werkstoffe mit dem Vickersverfahren zu prüfen.

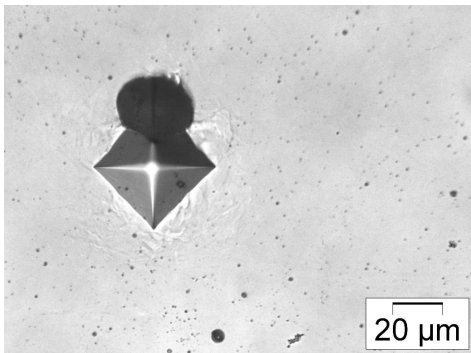
Die vielen zur Verfügung stehenden Prüfkraften gestatten eine zielgerichtete Auswahl je nach anstehender Prüfaufgabe. Soll die Härte an sehr dünnen Folien oder an Schichten geprüft werden, kann die Prüfkraft entsprechend gesenkt werden, sodass ein Durchdrücken nicht stattfinden kann.

Nachteilig bei einer manuellen Vermessung der Diagonalenlängen des Härteeindrucks ist der subjektive Einfluss auf das Messergebnis. Wird ein und derselbe Härteeindruck von zwei Personen vermessen, werden sich die Messergebnisse geringfügig unterscheiden. In den letzten Jahren hat sich allerdings immer stärker die automatisierte Vermessung der Eindrücke

mit elektrooptischen Bildverarbeitungssystemen durchgesetzt, sodass dieses Problem ausgeschlossen werden kann.

Weiterhin können Messprobleme bei härtebeeinflussenden Zweitphasen entstehen. Trifft der Eindringkörper beispielsweise seitlich auf einen sehr harten Gefügebestandteil, z. B. ein großes Carbideilchen bei Stählen, dann kann sogar eine ganze Ecke des Härteeindrucks fehlen (Bild 4-10). Außerdem ist es insbesondere bei extrem spröden Werkstoffen möglich, dass sich an den Kanten des Eindrucks Risse bilden. In diesem Fall muss davon ausgegangen werden, dass ein mit solchen Rissen behaftetes Bauteil nicht mehr verwendet werden kann.

Gegenüber der Brinellkugel ist die Diamantpyramide deutlich kostenintensiver. Außerdem ist der Diamant empfindlicher und kann bei einer schlagartigen Belastung abbrechen.



**Bild 4-10** Durch nichtmetallische Einschlüsse, große Karbide aber auch durch graphitische Einschlüsse werden die Härteeindrücke deformiert oder es fehlen, wie hier, ganze Bereiche des Härteeindrucks. Solche Härteeindrücke sind zu verwerfen.

### Anwendung

Aufgrund der Lastunabhängigkeit der Härtewerte, der hohen Genauigkeit, der vielen zur Verfügung stehenden Prüfkraft und der hohen Härte des Eindringkörpers ist die Vickershärteprüfung das in der Wissenschaft am häufigsten eingesetzte Härteprüfverfahren. Es kann für nahezu alle metallischen Werkstoffe verwendet werden. Die Vickersprüfung erlaubt sowohl sehr große Bauteile aber auch sehr dünne Schichten oder Folien zu untersuchen. Die Mikrohartprüfer, die in der Regel Zusatzgeräte für Mikroskope oder Elektronenmikroskope sind, erlauben es sogar, die Härte in einzelnen Körnern, Gefügen oder Gefügebestandteilen zu ermitteln. Für die Bestimmung des Härtegradienten und dessen charakterisierende Eigenschaften (Einhärtungs-Härtetiefe SHD, Einsatzhärtungs-Härtetiefe CHD, Nitrier-Härtetiefe NHD) an randschichtgehärteten, einsatzgehärteten oder nitrierten Bauteilen ist die Vickersprüfung im Kleinkraftbereich zwingend vorgeschrieben.

#### 4.4.4 Härteprüfung nach Rockwell Skala C HRC

Die Härteprüfung nach Rockwell unterscheidet sich in der Art des Eindringkörpers, der Kraftaufbringung und im Auswerteverfahren von der Vickers- und Brinellprüfung. Entsprechend der DIN EN ISO 6508 wird die Rockwellhärteprüfung in verschiedene Skalen unterteilt. Dahinter verbergen sich die Art des zu verwendenden Prüfkörpers (Hartmetall- oder Stahlkugel, Diamantkegel) und die Höhe der zu verwendenden Prüfkraft. Die größte praktische Bedeutung hat das Rockwellverfahren gemessen nach der Skala C HRC. Beim HRC-

# Index

## A

Abbildungsmaßstab des Objektivs 85  
Abkühlen 153  
Abkühlgeschwindigkeit, obere kritische 147  
–, untere kritische 147, 157  
Abkühlmittel 161  
 $\alpha$ -Eisen 95  
 $\alpha$ -Mischkristall 96  
Anfangslänge 48 f.  
Anfangsmesslänge 61  
Anfangsquerschnittsfläche 49, 61  
Anlassen 167  
Anlassstufe 168  
Anlassversprödung 170  
Anrissbildung 192  
Anwärmen 153  
 $\arcsin \sqrt{P}$ -Transformation 221, 225  
Ätzen 91  
Auhärtbarkeit 164  
Auflichtmikroskop 79  
Auflösungsgrenzen der Lichtmikroskopie 86, 90  
Ausdehnungskoeffizient, thermischer 136  
Außendurchmesser 48  
Austauschmischkristall 18  
Austenit 100 f., 103

## B

Bainit, oberer 144  
–, unterer 144  
Bainitisieren 144  
Beanspruchungsgrad 114  
begrenzte Löslichkeit im festen Zustand 33, 36  
Beugung 87  
Beugung am Doppelspalt 89  
Beugungsbild 87, 89  
Bezugssehweite 84  
Biegung 185  
Blausprödigkeit 170  
Brechungsanzahl 89

Breitung, laterale 194  
Brinellhärteprüfung 113  
Bruchdehnung 60  
Brucheinschnürung 60  
Bruchlastspielzahl 216

## C

chemische Kontrastierung 91  
Cotrell-Wolke 58  
Curietemperatur 96

## D

Dauerbruch 211  
Dauerfestigkeit 215, 217, 229  
Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith 229  
Dehngeschwindigkeit 54  
Dehnung 49, 55, 57  
 $\delta$ -Eisen 95  
 $\delta$ -Ferrit 100  
 $\delta$ -Mischkristall 96  
Differenzialinterferenzkontrast 93  
Diffusion 17  
Dilatometer 136  
Druckschwellbereich 215  
Dunkelfeldbeleuchtung 79  
Durchwärmen 153  
dynamische Härteprüfung 112

## E

Einfassen 75  
Einhärtbarkeit 161, 164  
Einlagerungsmischkristall 19  
einstufiger Schwingversuch 215  
Eisen 95  
Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 94  
elastische Verformung 56  
Elastizitätsmodul 57  
elektrochemische Kontrastierung 91  
Entfestigung, zyklische 210  
Enthalpie 13  
Entmischung 30

Entropie 13  
 Ermüdung 207 f.  
 Ermüdungsbruch 213  
 Erstarrungsintervall 24  
 eutektische Legierung 30  
 eutektische Temperatur 30, 34  
 eutektisches Gefüge 32  
 eutektisches System 33  
 eutektoid 39  
 eutektoide Entmischung 104  
 Extensometer 55  
 Extensometermesslänge 55  
 Extrusion 211

## F

Ferrit 100 f., 105, 139  
 Flachzugprobe 52  
 förderliche Vergrößerung 91  
 freie Enthalpie 13

## G

$\gamma$ -Eisen 95  
 $\gamma$ -Mischkristall 96  
 Gangunterschied 87  
 Gefüge 70  
 Gesamtvergrößerung des Mikroskops 84  
 Gesetz der abgewandten Hebelarme 40  
 Gewaltbruch 190, 213  
 Gibbssche Phasenregel 21  
 Gleichgewichtslinie 24  
 Gleichmaßdehnung 58 f.  
 gleichmäßig plastische Verformung 58  
 Grenzschwingspielzahl 216, 218

## H

Halten 153  
 Härbarkeit 164  
 Härte 112  
 Härten 144, 157  
 Härteprüfung 111  
 –, dynamische 112  
 – nach Brinell 113  
 – nach Rockwell 122  
 –, statische 112  
 Härtevergleichsplatte 127  
 Härteverlaufskurve 166  
 Hebelgesetz 40  
 Hellfeldbeleuchtung 79, 91  
 Hochlage 198

Höchstkraft 59  
 Hookesche Gerade 56  
 Hookesches Gesetz 56

## I

inkongruent schmelzend 38  
 Innendurchmesser 48  
 instabiler Rissfortschritt 188  
 instationäre Schwingung 214  
 Interferenz 87  
 interkristalliner Sprödbruch 192  
 intermetallische Phase 19, 38  
 Intrusion 211  
 isothermes ZTU-Diagramm 151

## K

Keimbildung 14  
 Keimradius, kritischer 15 f.  
 Keimwachstum 14  
 Kerbschlagbiegeversuch 178  
 Köhlern 81  
 kongruent schmelzend 38  
 Konode 26, 40  
 Kontrastierung 91  
 –, chemische 91  
 –, elektrochemische 91  
 –, optische 92  
 Kornflächenätzung 91  
 Korngrenzenätzung 91  
 Kraft 47  
 Kraftmessung 54  
 Kristallgemisch 30, 35  
 Kristallisation 14, 18  
 Kristallkeim 14  
 Kristallseigerung 27  
 kritischer Keimradius 15 f.  
 Kurzzeitfestigkeit 217

## L

laterale Breitung 194  
 Lattenmartensit 143  
 Ledeburit I 100  
 – II 100  
 Legierung 11  
 Liquiduslinie 25  
 logarithmische Formänderung 49  
 Löslichkeit 33  
 Löslichkeitsgrenze 34  
 Lüdersdehnung 57



## M

Martensit 140  
 Martensitbildung 141  
 Martensitstarttemperatur 147  
 Massivmartensit 143  
 Materialographie 70  
 Messlänge nach dem Bruch 61  
 Metallographie 70  
 metallographische Probenpräparation 72  
 Mikroskop, Gesamtvergrößerung 84  
 –, Strahlengang 79  
 Mischbruch 195  
 Mischungslücke 35  
 Mittelspannung 215

## N

Normalglühen 154  
 Normalisieren 154  
 Normalspannung 47  
 numerische Apertur 90

## O

obere kritische Abkühlgeschwindigkeit 147  
 obere Streckgrenze 57  
 oberer Bainit 144  
 Oberspannung 215  
 Objektiv, Abbildungsmaßstab 85  
 Objektivbezeichnung 90  
 Oktaederlücke 141  
 optische Kontrastierung 92

## P

Pendelschlagwerk 184  
 Peritektikum 37  
 peritektische Reaktion 37  
 peritektische Temperatur 37  
 peritektisches System 36  
 peritektoid 39  
 Perlit 100, 104 ff., 140  
 Phase 11  
 Phasenumwandlung 13  
 Plattenmartensit 143  
 Polarisationskontrast 92  
 Polieren 77  
 polymorph 39  
 Primärzementit 100  
 Probe 72  
 Probenbreite 48  
 Probendicke 48

Probendurchmesser 48  
 Proportionalitätsfaktor 51  
 Proportionalprobe 51

## Q

Querschnittsfläche nach dem Bruch 61

## R

Randschichthärten 158, 163  
 Rastlinie 213  
 Reineisen 101  
 Restaustenit 168  
 Restbruch 213  
 Rissbildung 211  
 Rissfortschritt, instabiler 188  
 –, stabiler 189  
 Risswachstum 211  
 Rockwellhärteprüfung 122  
 Rundzugprobe 51

## S

Schlagenergie, verbrauchte 183  
 Schlagenergie-Temperatur-Diagramm 198  
 Schleifen 76  
 Schwingfestigkeit 207  
 Schwingung, instationäre 214  
 –, stationäre 214  
 Schwingungen 214  
 Schwingungstreifen 213  
 Schwingversuch, einstufiger 215  
 Segregat 34  
 sekundäre Ausscheidung 34  
 Sekundärhärtemaximum 169  
 Sekundärzementit 101, 106  
 Smith-Diagramm 230  
 Soliduslinie 26  
 Spaltbruch 190 f.  
 Spannung 47  
 –, technische 49  
 –, wahre 62  
 Spannung-Dehnung-Diagramm 56  
 Spannungsamplitude 215  
 Spannungsspitze 181  
 Spannungsverhältnis 215  
 Sprödbbruch 188, 190  
 –, interkristalliner 192  
 –, transkristalliner 192  
 Sprödigkeit 180  
 stabiler Rissfortschritt 189  
 Stahl 134

stationäre Schwingung 214  
statisches Härteprüfverfahren 112  
Stirnabschreckversuch 166  
Stoffsystem 21  
Strahlengang im Mikroskop 79  
Streckgrenze, obere 57  
–, untere 58  
Stufenversetzung 190  
Substitutionsmischkristall 18

**T**

technische Spannung 49, 57  
Temperaturkonzept 198  
Tertiärzementit 101, 103  
thermische Analyse 12, 21, 136  
thermischer Ausdehnungskoeffizient 136  
Tieflage 198  
transkristalliner Sprödbruch 192  
Trennen 73  
Trennfestigkeit 188  
Treppenstufenverfahren 223

**U**

Übergangstemperatur 198  
Überlebenswahrscheinlichkeit 218  
Überstruktur 19  
Universalprüfmaschine 54  
Unlöslichkeit im festen Zustand 29  
untere kritische Abkühlgeschwindigkeit 147,  
157  
untere Streckgrenze 58  
unterer Bainit 144  
Unterspannung 215

**V**

verbrauchte Schlagenergie 183  
Verfestigung, zyklische 210  
Verformung 47  
Verformungsbruch 193  
Verformungsbruchanteil 203

Verformungsverfestigung 58  
Verformungswaben 193  
Vergrößerung 84, 86  
–, förderliche 91  
vergütet 158  
Verlängerung 48 f.  
Verlängerung der Extensometermesslänge 55  
Versetzungsbewegung 188  
Versuchslänge 52  
Vickershärteprüfung 118  
vollständige Löslichkeit 24

**W**

wahre Spannung 62  
Wahrscheinlichkeitsnetz 220  
Wärmebehandlung 153  
Wärmebehandlung von Stählen 134  
Wechselbereich 215  
Werkstoffkennwert 46  
Wöhlerkurve 217  
Wöhlerversuch 215

**Z**

Zähigkeit 178, 180, 183, 196 f.  
Zeitfestigkeit 215, 217, 219  
Zeit-Temperatur-  
Umwandlungsdiagramm 145  
Zementit 97  
Zonenmischkristall 27  
ZTU-Diagramm 145, 149  
–, isothermes 151  
–, kontinuierliches 145  
Zugfestigkeit 59  
Zugschwellbereich 215  
Zugversuch 46  
Zustandsdiagramm 21  
Zustandssystem 11  
Zweistoffsystem 21  
zyklische Entfestigung 210  
zyklische Verfestigung 210